

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.099



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



再生混凝土骨料与土工格栅的界面剪切特性

吴建奇¹, 罗翔¹, 王军², 李敏¹, 陈腾¹

(1. 江西理工大学 土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 温州大学 建筑工程学院, 浙江 温州 325035)

摘要: 随着经济的持续发展和城市规模的不断扩大, 建筑垃圾的资源化和再生利用势在必行, 作为建筑垃圾筛分破碎后的产物, 再生混凝土骨料有着广阔的应用前景。以 4 种不同粒径范围的再生混凝土骨料为研究对象, 引入孔径比概念, 通过室内大型直剪试验, 系统研究了 3 种不同竖向应力和 4 种不同剪切速率下再生混凝土骨料与双向聚丙烯土工格栅的界面剪切特性。结果表明: 孔径比越小, 剪切界面的峰值剪应力和残余剪应力越大, 且峰值剪应力出现位置越滞后; 随着孔径比的减小, 峰值似黏聚力和残余似黏聚力逐渐增大, 峰值内摩擦角和残余内摩擦角也逐渐增大; 土工格栅的加入可有效地减少界面剪胀现象; 引入卡尔哈韦本构方程, 通过线性拟合与对数拟合推导出剪切刚度表达式, 进而得到应力状态(σ_n, τ)下对应的剪切刚度值。

关键词: 再生混凝土骨料; 孔径比; 单调直剪; 土工格栅; 卡尔哈韦本构方程

中图分类号: TU528.041 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)01-0118-09

Shear characteristics of the interface between recycled concrete aggregate and geogrids

WU Jianqi¹, LUO Xiang¹, WANG Jun², LI Min¹, CHEN Teng¹

(1. College of Civil and Surveying Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, P. R. China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, P. R. China)

Abstract: In the context of ongoing economic development and urban expansion, there is an urgent need to promote the resource utilization and recycling of construction waste. As a crushed material obtained from the screening of construction waste, recycled concrete aggregate has broad application prospects. This study focuses on four distinct particle size ranges of recycled concrete aggregate. By introducing the concept of aperture ratio, the shear characteristics of the interface between the recycled concrete aggregate and biaxial polypropylene geogrids are investigated through large-scale direct shear tests under three different vertical stresses and four different shear rates. The findings demonstrate that as the aperture ratio diminishes, the peak shear stress and residual shear stress at the shear interface increased, and the peak shear stress occurred at a later stage. Conversely, as the aperture ratio decreases, the peak apparent cohesion and residual apparent cohesion undergo a gradual increase, and the peak internal friction angle and residual internal friction angle also increase. The addition of geogrids effectively reduces the occurrence of shear dilation at the interface. By introducing the

收稿日期: 2023-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(51768025)

作者简介: 吴建奇(1980-), 男, 副教授, 主要从事岩土工程研究, E-mail: wujq1980@jxust.edu.cn。

Received: 2023-06-20

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51768025)

Author brief: WU Jianqi (1980-), associate professor, main research interest: geotechnical engineering, E-mail: wujq1980@jxust.edu.cn.

Kalhay constitutive equation, the expression for shear stiffness is derived through linear and logarithmic fitting, and the shear stiffness corresponding to the stress state (σ_n, τ) is thereby obtained.

Keywords: recycled concrete aggregate; aperture ratio; monotonic direct shear; geogrid; Kalhay constitutive equation

近年来,城市化进程不断推进,新建、改建和拆除了大量建筑,特别是棚户区改造和老城区改造工程,产生了大量的废弃砖块和混凝土垃圾。传统的建筑垃圾处理方式为物理填埋,不但造成环境污染,也是对资源的一种浪费。这类建筑垃圾可被压碎成不同粒径的骨料,应用于道路铺设、地面改善、道路回填等各类岩土工程^[1-5]。肖建庄^[6]研究了再生混凝土的抗压强度、抗拉强度和抗折强度,结果表明,由于再生混凝土骨料(RCA)存在内在缺陷,与天然骨料普通混凝土相比,其抗压强度、抗拉强度和抗折强度均较低。Touahamia等^[7]研究了再生混凝土骨料的直剪特性,发现其内摩擦角明显低于天然骨料,需要通过加筋措施来提高其抗剪性能。

填料与土工格栅相互作用的机制比较复杂,与填料的密实度、颗粒级配、含水率及土工格栅的材料特性等因素有关^[8-10]。Nye等^[11]通过单调直剪和循环直剪试验研究了黏土与土工合成材料界面的剪切特性。Wu等^[12]、吴建奇等^[13]进行了一系列单调直剪、循环直剪、循环后直剪试验,根据试验结果分析了不同土工合成材料对再生混凝土骨料界面剪切特性的影响。王军等^[14]研究了不同颗粒级配下砂土与土工格栅界面的剪切特性,结果表明,级配良好的砂土与土工格栅界面的抗剪强度最大,经过循环剪切后界面抗剪强度显著提高。刘飞禹等^[15]通过一系列单调直剪试验、循环剪切试验和循环后单调直剪试验,研究了颗粒形状对粗粒土-格栅界面剪切行为的影响。Afzali-Nejad等^[16]通过直剪试验研究了砂土与土工布的界面剪切特性,揭示了骨料形状对界面峰值和残余摩擦角等参数的影响,得到了界面的统一应力膨胀规律。

土工格栅网孔孔径和填料粒径对加筋界面剪切特性的影响引起众多学者关注。王军等^[17-18]通过砂土与土工格栅界面的单调直剪试验发现,合理匹配土工格栅纵横肋的布设方式,能充分发挥筋土界面的强度,并分析了土工格栅网孔孔径和砂土粒径的关系对筋土界面剪切特性的影响。Liu等^[19]发现,土工格栅网孔孔径和骨料粒径之间存在一定的比例关系;为了综合考虑骨料形状和孔径比对筋土界面剪切特性的影响,引入了反映孔径比和颗粒间隙影响的膨胀指数。Han等^[20]发现,土工格栅的加固效果在很大程度上取决于填料和土工格栅之

间的相互作用,填料粒径和土工格栅网孔尺寸的合理匹配才能达到有效的加筋效果。

已有成果主要集中于黏土、砂土及再生混凝土骨料与土工格栅的界面剪切特性研究,未考虑孔径比对再生混凝土骨料与土工格栅界面剪切特性的影响。笔者通过一系列单调直剪试验,研究了再生混凝土骨料与土工格栅的界面剪切特性,引入卡尔哈韦(Kalhay)本构方程对峰值前的剪切应力-剪切位移关系曲线进行分析,揭示了不同孔径比下再生混凝土骨料与土工格栅界面剪切的作用机理。

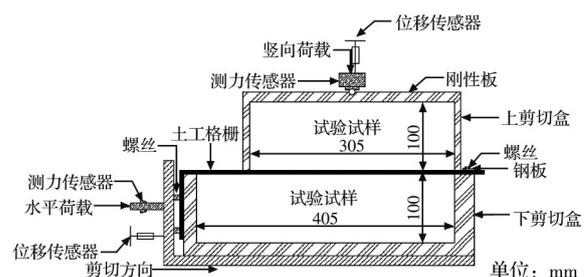
1 试验设备、材料及方案

1.1 试验设备

选用型号为 ShearTrac III 的室内大型直剪仪,如图 1 所示。上剪切盒的有效尺寸为 305 mm×305 mm×100 mm,下剪切盒的有效尺寸为 305 mm×405 mm×100 mm,上下剪切盒尺寸不同,目的是在试验过程中保证剪切面积不变,以减小误差。试验采用分层装填方式,先将再生混凝土骨料装入下剪切盒中,用螺丝和钢板固定好土工格栅,之后再继续分层装填上剪切盒。该设备能够以恒定速率施加应力或应变,运行时上剪切盒保持固定,竖向荷



(a) 室内大型直剪仪



(b) 直剪仪内部构造图

图 1 室内大型直剪仪

Fig. 1 Large-scale indoor direct shear apparatus

载通过刚性板作用于填料,水平荷载作用于下剪切盒;试验数据通过 2 个位移传感器和 2 个测力传感器采集,经机载软件实时记录并生成相关图表。

1.2 试验材料

试验所用填料为再生混凝土骨料,其中掺有少量再生砖骨料。通过不同孔径的筛对再生混凝土

骨料进行筛分,得到 4 种不同粒径范围的骨料试样,即 S1:0.6~4.75 mm, S2:4.75~9.5 mm, S3:9.5~16 mm, S4:16~26.5 mm, 试验所用试样见图 2。再生混凝土骨料的物理性质指标见表 1; 试验采用双向聚丙烯土工格栅作为加筋材料,其技术指标见表 2。

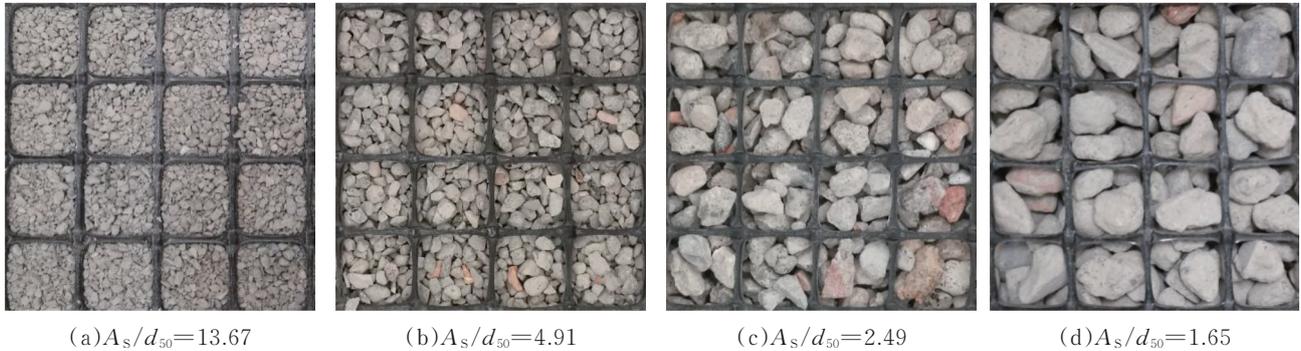


图 2 再生混凝土骨料试样

Fig. 2 Recycled concrete aggregate specimens

表 1 再生混凝土骨料的物理性质指标

Table 1 Physical property indices of recycled concrete aggregate

填料种类	颗粒粒径/mm				不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	最大孔隙比 e_{max}	最小孔隙比 e_{min}
	d_{10}	d_{30}	d_{50}	d_{60}				
S1	0.92	1.69	2.56	3.00	3.26	1.03	0.76	0.62
S2	5.23	6.18	7.13	7.60	1.45	0.96	0.79	0.65
S3	10.80	13.26	14.04	14.44	1.34	1.13	0.83	0.68
S4	17.02	19.07	21.19	22.25	1.31	0.96	0.86	0.72

表 2 土工格栅技术指标

Table 2 Technical indicators of geogrids

土工合成材料	单位面积质量/ (kg/m^2)	网孔尺寸	纵横肋条厚度/mm		极限延伸率/%		极限抗拉强度/(kN/m)	
			横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向
双向聚丙烯土工格栅	0.35	35 mm×35 mm	5	5	13	15	24	24

1.3 试验方案

在工程实践中,加筋材料尺寸的选择十分重要。为综合考虑土工格栅孔径和骨料粒径对界面剪切特性的影响,引入孔径比(A_s/d_{50})概念,其中 A_s 为土工格栅的孔径, d_{50} 为再生混凝土骨料的中值粒径。试验设定的孔径比取值分别为 13.67、4.91、2.49 和 1.65。

通过单调直剪试验,分别研究 3 种竖向应力(60、90、120 kPa)及 4 种孔径比(13.67、4.91、2.49、1.65)条件下 RCA 与土工格栅的界面剪切特性。此外,还通过 4 种不同剪切速率下的单调直剪试验探讨剪切速率对界面剪切特性的影响。试验方案见表 3。

表 3 试验方案

Table 3 Test scheme

试验类型	孔径比	试验材料
单调直剪试验	13.67、4.91、2.49、1.65	RCA、RCA+土工格栅
竖向应力/kPa		剪切速率/(mm/min)
60、90、120		0.5、1、2、4

2 试验结果与讨论

2.1 不同孔径比下再生混凝土骨料与土工格栅的界面剪切特性

图 3 为剪切速率为 1 mm/min 时,不同孔径比下再生混凝土骨料与土工格栅界面的剪切应力-位移关系曲线。由图 3 可知:

1) 不同孔径比下,再生混凝土骨料与土工格栅的界面剪切特性均表现出明显的剪切软化现象。

2)表 4 为各竖向应力下 4 种孔径比对应的峰值剪应力和残余剪应力。可以发现,孔径比越小,剪切界面的峰值剪应力和残余剪应力越大,且剪切应

力-位移关系曲线峰值出现的位置越滞后。这是由于大孔径比试样中土工格栅与填料颗粒间的嵌锁、咬合作用不明显。

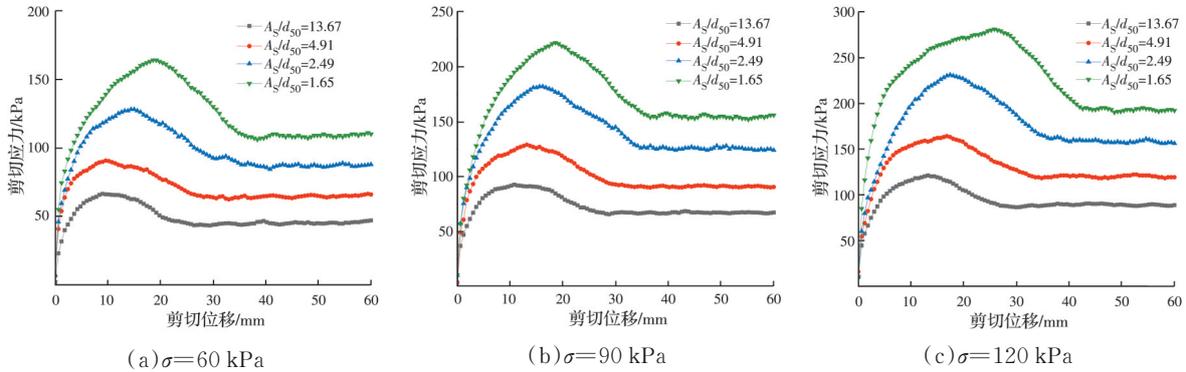


图 3 不同孔径比下界面的剪切应力-位移关系曲线

Fig. 3 Shear stress-displacement curves of interfaces under different aperture ratios

表 4 不同竖向应力下各孔径比对应的峰值剪应力和残余剪应力

Table 4 Peak and residual shear stresses corresponding to each aperture ratio under different vertical stresses

孔径比 A_s/d_{50}	60 kPa		90 kPa		120 kPa	
	峰值剪应力 / kPa	残余剪应力 / kPa	峰值剪应力 / kPa	残余剪应力 / kPa	峰值剪应力 / kPa	残余剪应力 / kPa
13.67	66.3	44.9	92.6	67.1	121.0	88.5
4.91	90.6	64.4	129.0	91.0	164.0	119.8
2.49	128.0	87.0	182.0	125.6	231.0	158.6
1.65	164.0	108.7	222.0	154.7	281.0	193.2

3)竖向应力越大,剪切界面的峰值剪应力和残余剪应力越大。当竖向应力从 60 kPa 增加到 90 kPa 时,峰值剪应力和残余剪应力增大 40% 左右;当竖向应力从 90 kPa 增加到 120 kPa 时,峰值剪应力和残余剪应力增大 30% 左右。

下再生混凝土骨料与土工格栅界面的竖向位移-剪切位移关系曲线。规定试样体积变化以膨胀为正、压缩为负。由图 4 可知:

图 4 为剪切速率为 1 mm/min 时,不同孔径比

1)在不同孔径比条件下,剪切界面在剪切初期发生剪缩,随后呈现显著剪胀;当剪切位移达到一定值后,界面剪胀速率逐渐减小。

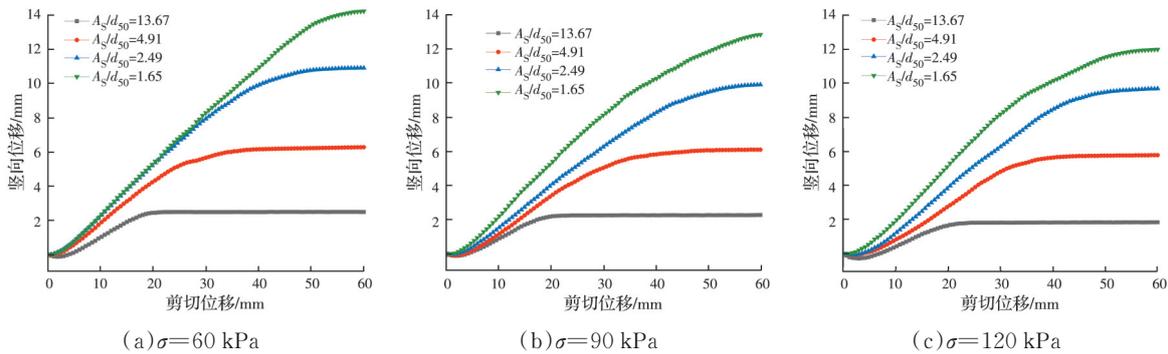


图 4 不同孔径比下界面的竖向位移-剪切位移关系曲线

Fig. 4 Vertical displacement-shear displacement curves of interfaces under different aperture ratios

2)由图 4 可见,随着孔径比的减小,试样的最终剪胀量逐渐增大。主要是由于试验所用土工格栅尺寸较大,孔径比越小意味着再生混凝土骨料粒径越大;而大粒径颗粒之间的滑移、错动更加突出,因此剪胀现象就更加明显。

3)对比图 4(a)、(b)、(c)可以发现,竖向应力越大,试样的最终剪胀量越小,即竖向应力越大,剪胀越不明显。这是因为在剪切过程中竖向应力越大,颗粒破碎现象越严重,破碎产生的细小颗粒填充颗粒间隙,使试样体积减小,最终表现为剪胀量的

减少^[21]。

图 5、图 6 为 60、90、120 kPa 竖向应力条件下峰值剪应力与残余剪应力的最佳拟合曲线。图中 R^2 为曲线的相关系数。结果表明,各孔径比下峰值剪应力、残余剪应力与竖向应力均呈线性关系, R^2 接近于 1, 拟合效果良好。根据莫尔库仑准则 $\tau = c + \sigma \tan \varphi$ 可计算出界面的似黏聚力和内摩擦角, 计算结果见表 5。峰值剪应力 τ_p 和残余剪应力 τ_r 对应的似黏聚力分别记为峰值似黏聚力 c_p 和残余似黏聚力 c_r ; 两者对应的内摩擦角则分别记为峰值内摩擦角 φ_p 和残余内摩擦角 φ_r 。结果表明, 峰值剪应力、残余剪应力与竖向应力均呈线性关系, R^2 接近于 1, 拟合效果良好。随着孔径比的减小, 峰值似黏聚力、残余似黏聚力以及峰值内摩擦角、残余内摩擦角均逐渐增大。这是因为填料颗粒表面粗糙不平, 颗粒间存在嵌锁、咬合作用, 且粒径大的粗颗粒周围被破碎后的细颗粒包裹, 导致其内摩擦角增大^[22]。

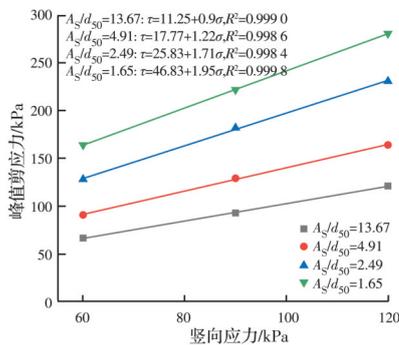


图 5 竖向应力与峰值剪应力线性回归曲线

Fig. 5 Linear regression curves of vertical stress and peak shear stress

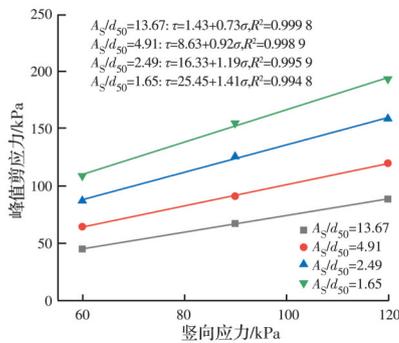


图 6 竖向应力与残余剪应力线性回归曲线

Fig. 6 Linear regression curves of vertical stress and residual shear stress

2.2 剪切速率对再生混凝土骨料与土工格栅界面剪切特性的影响

图 7、图 8 为竖向应力 90 kPa、孔径比 2.49 时,

表 5 不同孔径比下界面的似黏聚力和内摩擦角

Table 5 Interface apparent cohesion and internal friction angle under different aperture ratios

A_s/d_{50}	τ_p			τ_r		
	c_p /kPa	φ_p /($^\circ$)	R^2	c_r /kPa	φ_r /($^\circ$)	R^2
13.67	11.25	42.3	0.999 0	1.43	36.1	0.999 8
4.91	17.77	50.7	0.998 6	8.63	42.6	0.998 9
2.49	25.83	59.7	0.998 4	16.33	50.0	0.995 9
1.65	46.83	62.8	0.999 8	25.45	54.6	0.994 8

不同剪切速率下再生混凝土骨料与土工格栅界面的剪切应力-位移关系曲线和竖向位移-剪切位移关系曲线。从图中可以看出:1)4种不同剪切速率下, 剪切应力均随剪切位移的增加而增大, 在剪切位移约 15 mm 时达到峰值剪应力, 而后剪切应力逐渐减小, 减小到一定值后趋于稳定, 表现出明显的剪切软化现象;2)4种剪切速率下, 剪切界面在剪切初期均出现小幅剪缩, 随后快速发生剪胀, 当剪切位移达到 40 mm 后, 界面剪胀速率开始变小。图 7、图 8 表明, 不同剪切速率下得到的剪切应力-位移关系曲线和竖向位移-剪切位移关系曲线形态相似, 说明剪切速率对再生混凝土骨料与土工格栅界面剪切特性的影响较小, 与徐超等^[23]、刘飞禹等^[24]的筋-土界面直剪试验结果一致。

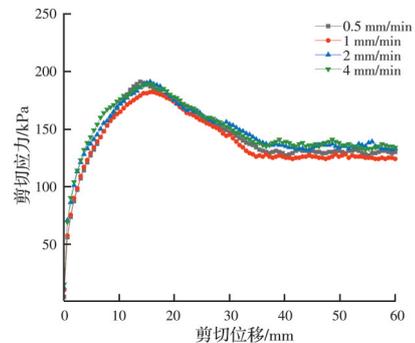


图 7 不同剪切速率下界面的剪切应力-位移关系曲线

Fig. 7 Shear stress-shear displacement curves of interfaces under different shear rates

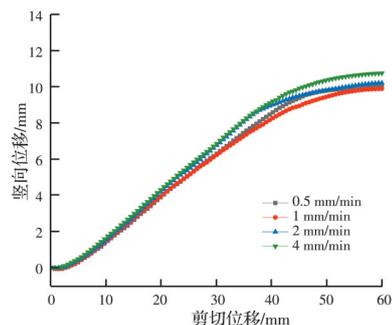


图 8 不同剪切速率下界面的竖向位移-剪切位移关系曲线

Fig. 8 Vertical displacement-shear displacement curves of interfaces under different shear rates

2.3 土工格栅对再生混凝土骨料界面剪切特性的影响

图 9、图 10 为孔径比 4.91、剪切速率 1 mm/min 时,单调直剪试验在 60、90、120 kPa 三种竖向应力下的加筋与未加筋试验结果。可以发现,加筋界面峰值剪应力对应的剪切位移分别为 9.6、13.2、16.8 mm,随着竖向应力的增大,剪切位移增加;未加筋界面峰值剪应力对应的剪切位移分别为 19.2、18.6、19.8 mm,即约 19 mm。对比单调直剪试验中加筋和未加筋界面的试验结果可知,加筋界面更快达到峰值剪应力,土工格栅的加入有效降低了界面的剪胀性。主要由土工格栅与再生混凝土骨料之间的嵌锁、咬合作用所致。

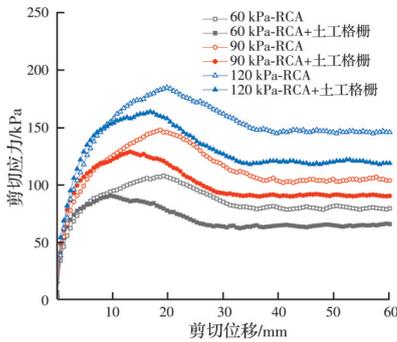


图 9 加筋/未加筋条件下剪切应力-位移关系曲线

Fig. 9 Shear stress-displacement curves under reinforced/unreinforced

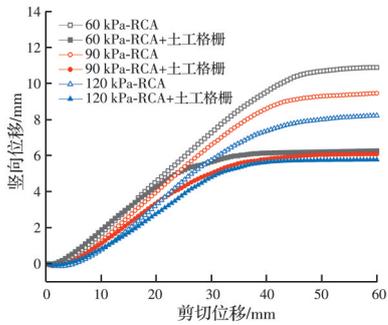


图 10 加筋/未加筋条件下竖向位移-剪切位移关系曲线

Fig. 10 Vertical displacement-shear displacement curves under reinforced/unreinforced

2.4 剪切应力-位移关系拟合分析

试验所得剪切应力-位移关系曲线为峰值后软化型曲线(图 11)。参考相关研究成果^[25],基于试验数据引入卡尔哈韦本构方程,在剪切应力达到峰值前,剪切应力与剪切位移的关系曲线可采用双曲线拟合,其表达式为

$$\tau = \frac{\Delta u}{m + n\Delta u} \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力; Δu 为剪切位移; m 、 n 为试验参数,其中 $m = 1/K_{si}$, K_{si} 为初始剪切刚度, $n = 1/\tau_{ult}$, τ_{ult} 为极限抗剪强度。

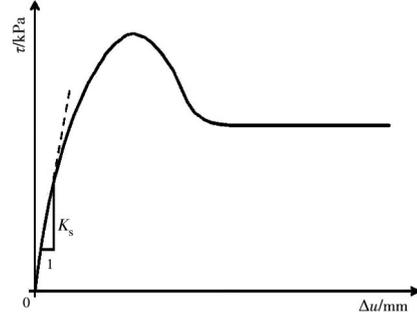


图 11 应变软化型曲线

Fig. 11 Strain-softening curve

研究表明^[26],初始剪切刚度 K_{si} 由式(2)确定。

$$K_{si} = K_j (\sigma_n)^{n_j} \quad (2)$$

式中: K_j 为剪切刚度数; n_j 为剪切刚度指数; σ_n 为界面法向应力。

剪切刚度 K_s 为 τ - Δu 曲线峰值前任一点的切线斜率,据此可推导出剪切刚度 K_s 的表达式

$$K_s = \frac{\partial \tau}{\partial \Delta u} = \frac{m}{(m + n\Delta u)^2} \quad (3)$$

将式(1)、式(2)代入式(3)可得

$$K_s = \frac{1}{m} (1 - n\tau)^2 = K_{si} \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{ult}}\right)^2 \quad (4)$$

式(1)还可改写为

$$\frac{1}{\tau} = m \frac{1}{\Delta u} + n \quad (5)$$

现以孔径比为 13.67、剪切速率为 1 mm/min 时 3 种竖向应力下的剪切应力-位移关系曲线为例,采用卡尔哈韦本构方程对峰值前的曲线进行拟合,可得到该曲线上任意一点的剪切刚度 K_s 。

通过线性拟合得到 $(1/\tau)$ - $(1/\Delta u)$ 的关系式(图 12),参照该拟合结果,通过对数拟合得到 K_{si} - σ_n 关系式(图 13)

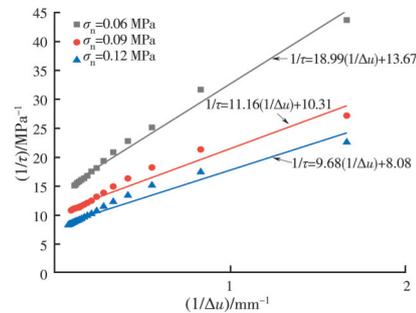


图 12 $(1/\tau)$ - $(1/\Delta u)$ 拟合曲线

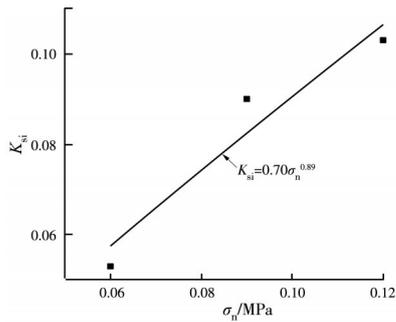
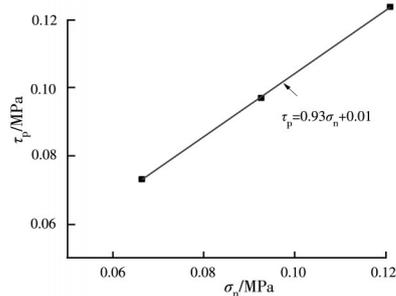
Fig. 12 $(1/\tau)$ - $(1/\Delta u)$ fitting curves

$$K_{si} = 0.70\sigma_n^{0.89} \quad (6)$$

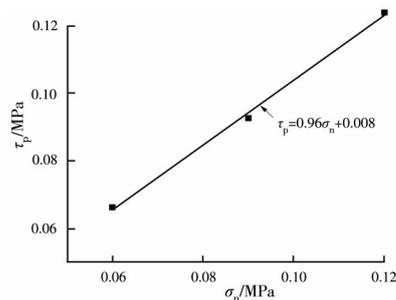
通过线性拟合得到 τ_{ult} - τ_p 关系式(图 14)

$$\tau_{ult} = 0.93\tau_p + 0.01 \quad (7)$$

通过线性拟合得到 τ_p - σ_n 关系式(图 15)

图 13 K_s - σ_n 拟合曲线Fig. 13 K_s - σ_n fitting curve图 14 τ_{ult} - τ_p 拟合曲线Fig. 14 τ_{ult} - τ_p fitting curve

$$\tau_p = 0.96\sigma_n + 0.008 \quad (8)$$

图 15 τ_p - σ_n 拟合曲线Fig. 15 τ_p - σ_n fitting curve

结合式(4)、式(6)、式(7)可得 K_s 的表达式

$$K_s = 0.70\sigma_n^{0.89} \left(1 - \frac{\tau}{0.93\tau_p + 0.01} \right)^2 \quad (9)$$

根据式(8)、式(9)可求得应力状态 (σ_n, τ) 条件下对应的剪切刚度 K_s 的表达式

$$K_s = 0.70\sigma_n^{0.89} \left(1 - \frac{\tau}{0.893\sigma_n + 0.017} \right)^2 \quad (10)$$

3 结论

通过一系列单调直剪试验,结合理论分析,得出以下结论:

1) 孔径比越小,界面的峰值剪应力与残余剪应力越大,剪切应力-位移关系曲线峰值出现的位置越滞后,且最终剪胀量越大。随着孔径比的减小,峰值似黏聚力、残余似黏聚力以及峰值内摩擦角、残

余内摩擦角均逐渐增大。孔径比对土工格栅与再生混凝土骨料的选择搭配具有指导意义:孔径比不宜过大,否则界面剪切强度会降低;也不宜过小,否则剪胀现象会更显著。

2) 竖向应力越大,剪切界面的峰值剪应力和残余剪应力越大,而试样的最终剪胀量越小。这是因为在剪切过程中竖向应力越大,颗粒破碎现象越严重,破碎产生的细小颗粒填充颗粒间隙,使得试样体积减小,表现为剪胀量的减少。

3) 不同剪切速率下,剪切应力-位移关系曲线和竖向位移-剪切位移关系曲线形态相似,说明剪切速率对再生混凝土骨料与土工格栅界面的剪切强度和变形行为影响较小。

4) 相较于未加筋界面,加筋界面能够更快达到峰值剪应力,且土工格栅的加入可有效减少界面的剪胀现象。在实际工程中,加入土工格栅能提高加筋界面的嵌锁作用,增强地基的承载力。

5) 结合试验结果,对剪切应力-位移关系曲线展开分析,引入卡尔哈韦本构方程描述曲线峰值前的响应行为,通过线性拟合和对数拟合推导出剪切刚度的表达式,可得到应力状态 (σ_n, τ) 下对应的剪切刚度 K_s 。该表达式在实际工程中能用于评估剪切变形和土体稳定性,通过预测风险并采取相应措施,能够确保施工安全。

参考文献

- [1] KUMAR SULUGURU A, JAYATHEJA M, KAR A, et al. Experimental studies on the microstructural, physical and chemical characteristics of building derived materials to assess their suitability in ground improvement [J]. Construction and Building Materials, 2017, 156: 921-932.
 - [2] MADUABUCHUKWU NWAKAIRE C, POH YAP S, CHUEN ONN C, et al. Utilisation of recycled concrete aggregates for sustainable highway pavement applications: A review [J]. Construction and Building Materials, 2020, 235: 117444.
 - [3] RAHMAN M A, IMTEAZ M, ARULRAJAH A, et al. Suitability of recycled construction and demolition aggregates as alternative pipe backfilling materials [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 66: 75-84.
 - [4] 刘惠, 王震, 郝亚利, 等. 再生粗骨料品质对混凝土抗溶蚀性能的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(2): 187-193.
- LIU H, WANG Z, HAO Y L, et al. Effect of quality of recycled coarse aggregate on the corrosion resistance of concrete [J]. Journal of Civil and Environmental Engi-

- neering, 2023, 45(2): 187-193. (in Chinese)
- [5] POON C S, CHAN D. Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base [J]. *Construction and Building Materials*, 2006, 20(8): 578-585.
- [6] 肖建庄. 再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(11): 1445-1449.
XIAO J Z. Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2007, 35(11): 1445-1449. (in Chinese)
- [7] TOUAHAMIA M, SIVAKUMAR V, MCKELVEY D. Shear strength of reinforced-recycled material [J]. *Construction and Building Materials*, 2002, 16(6): 331-339.
- [8] YING M, LIU F Y, WANG J, et al. Coupling effects of particle shape and cyclic shear history on shear properties of coarse-grained soil-geogrid interface [J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, 27: 100504.
- [9] FERREIRA F B, VIEIRA C S, LOPES M L. Direct shear behaviour of residual soil-geosynthetic interfaces-influence of soil moisture content, soil density and geosynthetic type [J]. *Geosynthetics International*, 2015, 22(3): 257-272.
- [10] PACHECO-TORRES R, CERRO-PRADA E, ESCOLANO F, et al. Fatigue performance of waste rubber concrete for rigid road pavements [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 176: 539-548.
- [11] NYE C J, FOX P J. Dynamic shear behavior of a needle-punched geosynthetic clay liner [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(8): 973-983.
- [12] WU J Q, LI L, YUAN G H, et al. Shear characteristics of the interface between recycled concrete aggregates and various geosynthetics [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 1-10.
- [13] 吴建奇, 李磊, 王军. 不同土工合成材料与再生混凝土骨料界面动剪切特性研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(1): 279-287.
WU J Q, LI L, WANG J. Dynamic shear characteristics of interface between different geosynthetics and recycled concrete aggregate [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(1): 279-287. (in Chinese)
- [14] 王军, 施静, 刘飞禹, 等. 砂土颗粒级配对格栅-土界面静、动力直剪特性的影响[J]. *岩土力学*, 2019, 40(1): 109-117.
WANG J, SHI J, LIU F Y, et al. Effect of particle gradation on static and dynamic direct shear properties of geogrid-sand interface [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(1): 109-117. (in Chinese)
- [15] 刘飞禹, 郑其婷, 王军, 等. 颗粒形状对粗粒土-格栅界面剪切特性的影响[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(6): 48-56.
LIU F Y, ZHENG Q T, WANG J, et al. Effects of particle shape on shear behaviors of interface between coarse-grained soil and geogrid [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(6): 48-56. (in Chinese)
- [16] AFZALI-NEJAD A, LASHKARI A, SHOURIJEH P T. Influence of particle shape on the shear strength and dilation of sand-woven geotextile interfaces [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2017, 45(1): 54-66.
- [17] 王军, 林旭, 刘飞禹, 等. 砂土与格栅界面相互作用的直剪试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(增刊 1): 113-120.
WANG J, LIN X, LIU F Y, et al. Research on interaction of geogrid and sand interface by direct shear tests [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(Sup 1): 113-120. (in Chinese)
- [18] 王军, 胡惠丽, 刘飞禹, 等. 粒孔比对筋土界面直剪特性的影响[J]. *岩土力学*, 2018, 39(增刊 2): 115-122.
WANG J, HU H L, LIU F Y, et al. Effects of direct shear characteristics of sand-geogrid interface under different aperture ratios [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(Sup 2): 115-122. (in Chinese)
- [19] LIU F Y, ZHENG Q T, WANG J, et al. Effect of particle shape on shear behaviour of aggregate-geogrid interface under different aperture ratios [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2022, 23(7): 2099-2109.
- [20] HAN B Y, LING J M, SHU X, et al. Laboratory investigation of particle size effects on the shear behavior of aggregate-geogrid interface [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 158: 1015-1025.
- [21] 陈青林. 高堆尾矿细粒夹层异质性与粗粒破碎效应研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
CHEN Q L. Study on heterogeneity of fine-grained interlayer and coarse-grained crushing effect of high-piled tailings [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. (in Chinese)
- [22] SWETA K, HUSSAINI S K K. Behavior evaluation of geogrid-reinforced ballast-subballast interface under shear condition [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2019, 47(1): 23-31.
- [23] 徐超, 孟凡祥. 剪切速率和材料特性对筋-土界面抗剪强度的影响[J]. *岩土力学*, 2010, 31(10): 3101-3106.
XU C, MENG F X. Effects of shear rate and material properties on shear strength of geosynthetic-soil interface [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(10): 3101-3106. (in Chinese)

- [24] 刘飞禹, 王攀, 王军, 等. 不同剪切速率下格栅-土界面循环剪切及其后直剪特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 387-395.
LIU F Y, WANG P, WANG J, et al. Cyclic and post-cyclic shear behavior of sand-geogrid interface under different shear rates [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 387-395. (in Chinese)
- [25] LI C, ZHANG R T, LU B, et al. Analytical model of the deformation response of bedding slopes to excavation on the basis of Mindlin's strain solution [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 570(6): 062008.
- [26] 许宏发, 金丰年. 岩体节理剪切变形的幂函数模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 314-317.
XU H F, JIN F N. Power function model of shear deformation for rock joints [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 314-317. (in Chinese)

(编辑 朱备)